

海底に賦存するメタンハイドレート資源を採掘する 様々な方法の検討と提案

INVESTIGATION OF VARIOUS METHODS FOR EXPLOITATION OF OCEAN METHANE HYDRATE AND PROPOSAL OF ESR METHOD

谷 和夫*

Kazuo TANI

Methane hydrate reservoirs found in deep ocean floor are considered as promising natural gas resources. Literature review is conducted on various methods for exploitation of this ocean methane hydrate including some popular methods utilizing thermal stimulation and depressurization to extract dissociated methane hydrate through deep-drilled wells. Then, the excavation-separation-retrieval method proposed as a new mining method for ocean methane hydrate is examined. Its merits and relevant future development are discussed.

Key Words: methane hydrate, mining, excavation, separation, retrieval, exploitation

1. はじめに

(1) 海底のメタンハイドレート

メタンハイドレート(以後、MH と称す)は、籠状に結合した水分子群にメタン分子が内包されている氷状の固体物質である。有機物が起源の MH は、低温・高圧の状態では化学的に安定であるため、大陸・島弧の縁辺海域の堆積層や極地の永久凍土に存在する。我が国の近海(沖合 20-150km)の大陸棚中(水深 500m 以上、海底より深さ数百 m までの範囲)に MH 層が存在すると推定されており、非在来型の天然ガス資源として注目されている¹⁾。

在来型の天然ガス資源は、気体として、あるいは間隙水中に溶けて存在するので流動性がある。よって、一般に背斜構造部などのトラップの下位に存在する浸透率と孔隙率が高い貯留岩より、坑井を利用して容易に回収することができる。しかし、固体の MH は流動性がなく、MH 層は水平方向に広く分散して賦存し、浸透率も低いので、在来型の天然ガス資源と同様の方法をそのまま適用することはできない。

(2) 従来から検討されているメタンハイドレートの採掘方法とその問題

現在、海底の MH の採掘方法として主に検討されているのは、在来型の天然ガス資源を対象とする採掘方法の延長上にある。すなわち、坑井を基点として、何らかの手段を用いて MH を分解させた後に回収する方式である²⁾。MH を分解するにはその胚胎環境(相平衡条件より低温・高圧側)を不安定化させる必要があり、基本的に以下に示す 3 種類の方法を単独、あるいは組み合わせて用いることが想定される。

① 熱刺激法: 熱を供給して、状態点を相平衡温度より高温にする

② 減圧法: 作用する圧力を下げて、状態点を相平衡圧力より低圧にする

③ 相平衡制御法: 塩類などを利用して、相平衡条件を低温・高圧側に移動して、状態点を不安定領域にする
しかし、この分解・回収方式には多くの問題が指摘されている³⁾。まず、MH 層中に掘削された生産坑井が、MH の分解に伴って崩壊する可能性がある。また、MH 層の連続性や MH の含有率が低い場合には、熱や圧力変化の伝達効率や

* Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

メタンの回収効率が低くなるので、高い生産性（坑井当たりの生産量）が望めないことが懸念される。さらに、MHを分解するために投入する熱エネルギー（例えば、潜熱：54.2kJ/mol）がメタンの燃焼発熱量（890kJ/mol）と比較して相当なものになる（エネルギー効率が低い）可能性があり、相平衡条件を制御する塩類も非常に高価なので、経済性が問題視されている。

したがって、採掘インフラの安全性が高く、MH層の性状（連続性や含有率）に対する適用性が高く、エネルギー損失が極力少なく、広い範囲のMHを継続的に長期に涉って採掘できる生産性が高い採掘方法の開発が望まれている。

そこで、まず文献調査を行い、MH資源を採掘する方法に関する既存の提案の特徴や問題を包括的に整理・分析した。そして、その結果を受けて、著者が最近提案している採掘方法³⁾を再検討した。

2. メタンハイドレートの採掘方法に関する文献調査

(1) 文献調査の方法

MH資源を採掘する方法に関する様々な提案を整理・分析することを目的として、文献調査を実施した。内容的に研究論文の公表よりは特許の出願が一般的であることを考慮して、調査対象を日本、米国、欧州の特許庁のHPで検索できる公開公報とした。

(2) 文献調査の結果

日本、米国、欧州の特許庁に出願された各10件、10件、4件の特許出願の内、5件が重複する出願であるため、独立した出願は合計19件である⁴⁻²²⁾。各出願の内容を、採掘方法の特徴、対象とするMH層、MHの分解、MH層の掘削、設備の構成などに関して整理・分析した結果を表-1に示す。

提案された採掘方法は2つのグループに大別することができる。1つのグループは14件と多く、石油や在来型天然ガスの採掘技術を応用するために、固体のMHを分解してメタンとして回収する方法である。もう1つのグループは5件で、補助的にMHの一部を分解させることはあっても、基本的にはMH層を掘削して固体のMHとして回収する方法である。前者は分解方法の種類（熱刺激法、減圧法および平衡条件制御法）に、後者は掘削方法の種類（露天掘り、坑井掘削、坑道掘削）に応じてさらに分類できる。

a) メタンハイドレートを分解する方法

補助的に分解をする場合も含めて、すべての出願で熱刺激法が採用されていた。熱源としては、表層の温海水ないし加熱した温水^{4, 5, 6, 7, 8, 12, 16, 17, 21)}、高温蒸気^{9, 11, 17)}、CO₂ハイドレートの生成熱^{9, 13)}、電気エネルギー（MH層ないし電気抵抗体への通電）^{10, 15)}、深海原子炉の廃熱¹²⁾、電磁波の照射¹³⁾、酸・アルカリ溶液の中和反応熱²⁰⁾などが提案されている。ただし、上述したように、分解に要する熱エネルギーが大きい（エネルギー効率が低い）ことが問題である。よって、採掘後の地盤の安定化、CO₂や廃棄物の処分、廃熱利用など、熱供給以外の多様な便益が期待できる方法が望まれる。また、分解プロセスが遅いことや、熱の伝達効率や分解したメタンの回収効率が低いことなどの問題も指摘されている^{18, 20)}。

一方、減圧法としては、浅部に移送^{6, 16)}ないしポンプ吸引^{10, 22)}による水圧低下作用、あるいはMHの分解に伴う間隙増加（密度減少）による二次的な作用²⁰⁾などが実施例として示されている。しかし、熱刺激法と併用することを前提とし、補助的な効果しか期待されていない。潜熱が奪われて温度が低下するというMHの自己保存効果のために分解効率が非常に悪く、またMH層内に低圧環境を安定的に維持することも難しいことが理由であろう^{18, 20)}。

平衡条件制御法は、塩類、触媒ないし凝固点降下剤を使用する方法^{4, 10, 18, 20, 22)}で、やはり補助的な方法に位置付けられている。使用する塩類などが高価で経済性が低いことや、減圧法と同じく自己保存効果の問題が原因であろう¹⁸⁾。

分類上は平衡条件制御法に含まれる可能性もあるが、この他に、ブタンなど分子量が小さい炭化水素の液体ないし特殊な塩溶液を循環しながら継続的にMHを分解・回収するアイデア^{18, 22)}も注目される。ただし、原理がよく理解で

表-1 文献調査の結果

[illegible]

きなかった。

b) メタンハイドレート層を掘削する方法

固体の MH として採掘すること以外にも、分解を促進することを目的とした場合も含めて、MH 層を掘削するさまざまな方法が提案されている。海底面ないし浅部に存在する MH 層を露天掘りにより掘削（明かり掘削や浚渫）する場合には、高速（ジェット）噴流などによる水流式^{6, 7, 14, 16)}、あるいは回転ドラムやオーガーなどによる機械式^{10, 14, 18)}が実施例として挙げられている。一方、深部に存在する MH 層を掘削する場合には、坑井からの高速（ジェット）噴流など水流式⁴⁾、あるいは坑道掘削ないし削孔に類似した機械式⁵⁾が示されている。

MH 層を掘削する場合の利点は、分解に伴うエネルギー損失がないことや、回収効率が高いことなどである。しかし、我が国の近海で想定される MH 層の深度が数百 m であり、MH 層が強度的に弱い軟岩程度と推測されることを考慮すると、現状の施工技術では困難が予想される。深部地盤を安全かつ経済的に掘削する画期的な方法の研究・開発が必須である。

c) 補助的な工法と MH 層への到達方法

深部の MH 層を分解する方法では、採掘範囲が坑井の近傍に限定される虞があるので、水圧破碎によって分解作用が影響する範囲を拡大する方法が提案されている^{15, 18, 21)}。また、海底地盤中の MH 層への到達方法としては、海底からの削孔ないし掘削が一般的だが、陸地からトンネルを掘削する提案もある¹¹⁾。MH 層の多様な性状に対する適用性を高め、さらに広い回収範囲と高い回収効率を実現するための工夫が求められる。

d) メタンハイドレートやメタンと土砂を分離する方法

分解せずに MH 層を掘削する方法の場合には、MH やメタンと土砂を分離する必要がある。粗粒の土砂は掘削地点ないし海底面において可能な限り取り除き、残りの細粒分はスラリー状として浮揚式プラットフォームに移送した後に分離する方法が一般的である。具体的には、沈降選別や遠心分離など、MH と土砂の比重差を利用する手段が示されている^{5, 21)}。採掘物の多様な性状に対する適用性を高め、いかに効率的に分離するかが重要である。

e) メタンハイドレートないしメタンを回収する方法

回収する採掘物の形態は、MH を分解する方法の場合にはメタン（ガス状ないし海水に溶解した状態）である。一方、MH 層を掘削する方法の場合には、一部分解したメタンの他に、固体の MH（塊状ないし微粉状）、あるいは土砂も含まれる。そこで、不要な土砂を極力分離しながら採掘物を効率良く回収し、浮揚式プラットフォーム上ないし陸上の一次貯蔵施設へ移送することになる。

採掘物を効率的に回収する方法として、ライザーの下端にラッパ型のコレクターないし吸収ダクトを装備する方法^{7, 10, 16)}や海底面を覆うようにフレキシブルシートを設置する方法^{8, 14)}なども提案されている。これらの回収方法は、分解せずに掘削する方法と組み合わせると高い回収効率が可能になると期待される。移送の経路は、陸域からトンネルを掘削する方法を除けば、ライザーが一般的である。移送手段は、ポンプアップと、一部分解によって生じたガス状のメタンないし密度が海水より軽い MH の浮揚効果を利用することが考えられている^{4, 5, 6, 7, 16)}。

3. 提案する掘削・分別・回収方式によるメタンハイドレートの採掘方法の概要

著者が提案している海底の MH 層を採掘する方法³⁾の概念を図-1 示す。海洋土木の機械施工技術や陸域の固体資源の採掘技術を積極的に活用し、かつ MH の安定条件や物理的な特性を利用している点に特徴があり、掘削・分別・回収（Excavation, Separation, Retrieval：以後 ESR と称す）方式と称する。

陸域の固体資源の採掘と同じく、MH 層が海底面ないし浅部に存在する場合には露天掘り方式を、深部に賦存する場

合には坑道掘削方式などを採用する。掘削したMH層は、掘削地点ないし海底で破碎（細粒化）し、MHとMH以外の土砂に効率的に比重分離（MHの密度： $0.912\text{g}/\text{cm}^3$ ）する。分離しきれないものはスラリー状にして、浮揚式プラットフォームに移送してから分解し、メタンを気液分離する。また、MHおよび一部分解したガス状ないし海水に溶解したメタン、さらにはMH層の下位から漏洩するフリーガスも、海底面に設置した大規模な膜構造（フレキシブルシート）で全て捕捉して回収する。

採掘地区内の適切な位置には、浮揚式プラットフォームないし陸上との連絡経路を有する中心基地（サポート・ステーション）が設けられる。そして、さまざまな作業を行うユニット編成の機動部隊が、中心基地から周辺の鉱区に派遣される。この機動部隊は、基本的に無人で遠隔操作あるいは自動制御される複数の移動型ロボット重機類で構成される。

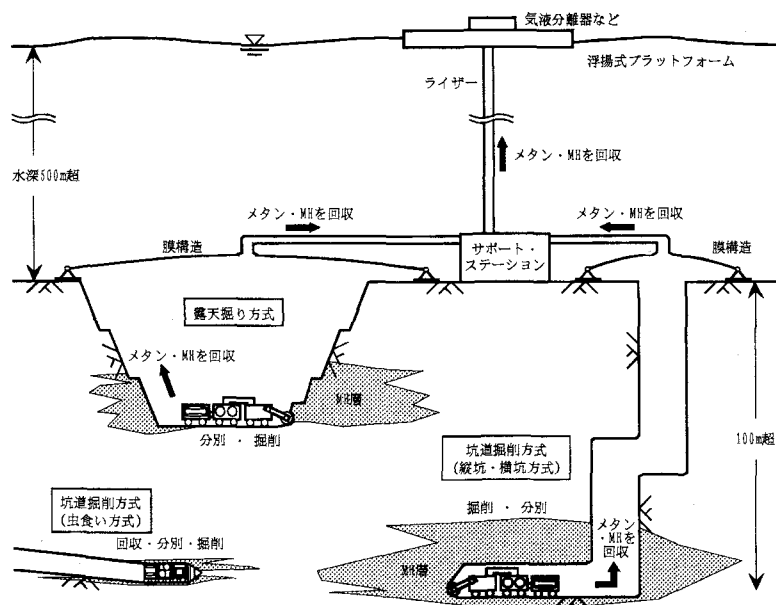


図-1 海底のMH層を採掘する方法（ESR方式）の概念

4. 提案方法の再検討と実用化に向けて研究・開発が必要な技術課題

(1) ESR方式の利点

掘削に関わる要素技術については、浚渫や明かり・トンネル・空洞の掘削、あるいは石炭や鉄鉱石などの固体資源の採掘で培われた技術などを応用することが可能である。坑井の掘削に比較して、露天掘り方式や坑道掘削方式は採掘方向や範囲を制御する自由度が高く、MH層の性状（連続性や含有率）に応じて適切な範囲を選択的に採掘することができて効率的である。また、固体のMHとして採掘するので、分解する方法と比較してエネルギー効率の面で有利である。さらに、MHはエネルギーの体積密度が高いため、採掘後の移送効率や貯蔵効率の面でも優れている。

分別（破碎・選別・不純物除去）に関わる要素技術は、地上ないし浅海中において既に確立された土木技術の延長上にあるため、実現の可能性が高い。特に沈降選別や遠心分離は、原理や設備の構造が単純なので、比重選別の手段として有効であろう。

大規模な膜構造の利用により、MH層に賦存するメタンだけでなく、下位のフリーガスをも捕捉できるので高い回収率が期待できる。一部分解によって生じたガス状のメタンないし密度が海水より軽いMHの浮揚効果を利用することで、海上への移送も効率的に行われると期待される。

(2) ESR方式の問題点と技術課題

ESR方式における掘削・分別・回収の要素技術は、地上ないし浅海中では既に確立された土木技術ではある。しかし、深海（水深500m超）におけるMHの採掘に適用できるようにするためには、以下に示すような多くの技術的な課題を解決する必要がある。

掘削については、MH層が深部に賦存して、露天掘り方式が不経済となるような場合が問題となる。坑道掘削方式も

考えられるが、土留めや支保、あるいは地山補強など複雑な施工を、深海において陸上鉱山と同程度の精度や信頼性で実施することは至難である。MH 層に適した海底深部地盤の掘削・浚渫の工法や重機などの開発が望まれる。また分別については、MH と土砂を海底で効率的に比重選別する方法の開発が最も重要である²³⁾。さらに回収については、鉱区全体を覆うような大規模な膜構造の設計や施工技術の開発が望まれる。

採掘作業を実際に行う重機類の開発も重要である。各機械部品のロバスト化（長寿命化、交換・修理の不要化や容易化）、耐水・耐圧性能の向上は必須である。また、重機類による機械施工の完全無人化・完全自動化を達成するために、制御や操作の高精度化・高効率化や信頼性の向上、事故対策や危機管理手法の開発なども必要である。その他、表-1 に示すさまざまな採掘方法にも共通する技術課題も忘れてはならない。例えば、MH 層の採掘に伴う地盤の安定性を評価する技術、MH 層の賦存状況を詳細に探査・調査する技術などである。

5. まとめ

海底の MH を採掘する方法について、文献調査の結果を 2 章に、新しく提案する ESR 方式と実用化に向けた主要な技術課題を 3 章と 4 章に示した。

海に囲まれた我が国は、戦後の高度経済成長期を通じて、沿岸・臨海部で海上空港や港湾などの社会基盤を大量に整備した結果、20 世紀末には世界最高水準の海洋土木の施工技術を確立した。特に、浚渫に関する技術レベルは他国の追従を許さず、既に完全水没型の浚渫ロボットも実用化している²⁴⁾。また、機械施工に関する高い遠隔操作・自動制御の技術についても、我が国の産業界は、人間型ロボットや建設ロボットに代表されるように、圧倒的な国際競争力を誇っている。したがって、提案する ESR 方式による MH の採掘方法が浚渫技術および機械施工技術を中心的な要素技術としていることを考慮すると、国際的に見て競争力のある独創的かつ革新的な技術開発が我が国で行われる素地が充分にある。

今後、提案する ESR 方式による MH の採掘方法の実用化を目指して、実現可能な採掘システムの基本構成を具体的に示すと共に、その実現可能性を定量的に明らかにするフィージビリティ・スタディーを実施する必要がある。

参考文献

- 1) 天然ガス部会：よくわかる天然ガス、日本エネルギー学会、222p、1999。
- 2) メタンハイドレート資源開発コンソーシアム：平成 14 年度研究成果報告、2003。
- 3) 谷 和夫：掘削・分別・回収方式による海底のメタンハイドレートを採掘する方法に関する提案と解決すべき技術課題、第 48 回地盤工学シンポジウム、地盤工学会、pp.383-388、2003。
- 4) 飛島建設株式会社、富士総合研究所：特開 2003-214082、US Patent No.20030136585。
- 5) 三菱重工業株式会社：特開 2003-193788。
- 6) Heinz, H.：特開 2002-536573、EP0 Patent No.W00047832。
- 7) 紙屋 稔：特開 2001-280055。
- 8) 太陽工業株式会社：特開 2000-282775、US Patent No.6192691。
- 9) 株式会社東芝：特開 2000-61293。
- 10) Syntroleum Corporation：特開 2000-513061、US Patent No.5950732、EP0 Patent No.W09844078。
- 11) 三和開発工業株式会社：特開平 10-317869。
- 12) 動力炉・核燃料開発事業団：特開平 9-158662。
- 13) 千代田化工建設株式会社、北陸電力株式会社、株式会社スギノマシン：特開平 6-71161。
- 14) USA Dep. of Energy：US Patent No.6299256。
- 15) Atlantic Richfield Company：US Patent No.6148911。
- 16) Sandia Corporation：US Patent No.6209965。
- 17) USA：US Patent No.4376462。
- 18) Phillips Petroleum Company：US Patent No.4007787。
- 19) Mobil Oil Corporation：US Patent No.6214175。
- 20) Halliburton Energy Services, Inc.：US Patent No.5713416。
- 21) Juergen, S.H., Wilhelm, A., Adam, H., Tim, S., Forschung, F.G., Juergen, G.-H., Stefan, S.：EP0 Patent No.W003021079。
- 22) Stephen, A.：EP0 Patent No.W003029612。
- 23) 栗田宣子・谷 和夫：メタンハイドレート模擬試料の落下破碎試験と一面せん断試験、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、6p、2004。
- 24) 五洋建設：ふたば 2 号、パンフレット、2002。